干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2020.01.02

2000—2014 年喀喇昆仑山音苏盖提冰川表面高程变化[①]

蒋宗立[1]，王 磊[1]，张 震[2]，刘时银[3]，张 勇[1]，唐志光[1]，魏俊锋[1]，黄丹妮[2]，张莎莎[2]

（1 湖南科技大学煤炭清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室，湖南 湘潭 411201；
2 安徽理工大学测绘学院，安徽 淮南 232001；3 云南大学国际河流与生态安全研究院，云南 昆明 650500）

摘 要：喀喇昆仑山区冰川由于存在正物质平衡或跃动、前进现象，被称之为“喀喇昆仑异常”，不过该地区冰川变化差异显著，尤其是大型表碛覆盖冰川，呈现与其他类型冰川明显的差异性响应，为理解喀喇昆仑冰川异常的机理，冰川尺度的详细变化研究十分必要。音苏盖提冰川位于喀喇昆仑山乔戈里峰北坡，是中国面积最大的冰川，是典型的大型表碛覆盖冰川。通过应用 TanDEM-X/TerraSAR-X（2014 年 2 月）与 SRTM-X DEM（2000 年 2 月）的差分干涉测量方法计算音苏盖提冰川表面高程变化，并结合冰川表面流速对冰川表面高程变化和跃动进行分析和讨论。结果表明：2000—2014 年音苏盖提冰川表面高程平均下降了 1.68 ±0.94 m，即冰川整体厚度在减薄，年变化率为 $-0.12 \pm 0.07\ m \cdot a^{-1}$。冰川表面高程变化分布不均，其中南分支（S）冰流冰川整体减薄较为显著，冰川南分支冰流运动速度较快，前进/跃动的末端占据了冰川的主干，阻滞原主干冰川物质的向下运移（跃动），导致原主干冰舌表面高程上升；冰川厚度减薄随着海拔升高先下降后保持稳定，同时呈现一定的波动性；低海拔表碛区域消融大于裸冰区，可能存在较薄表碛，因热传导高、覆盖大量冰面湖塘和冰崖存在，加速了冰川消融；在坡度小于 30 °的区域，冰川厚度减薄随着坡度的减小而加剧；坡向朝南冰川厚度略微增加（0.01 m），西南坡向冰川厚度略微减薄（－0.03 m），其他坡向冰川厚度减薄明显。近 14 a 来，表碛覆盖的音苏盖提冰川表面高程整体下降表明物质处于亏损状态，冰川跃动导致局部冰川表面高程的增加。

关 键 词： 音苏盖提冰川；TanDEM-X/TerraSAR-X；差分干涉测量；表面高程变化；冰川跃动

冰冻圈是与气候变化相互影响的重要圈层，是气候变化的指示器[1－2]，也是重要的淡水资源宝库，是重要的服务圈层[3]。气候变暖背景下，全球冰川普遍处于退缩状态，而喀喇昆仑山大部分冰川呈现前进或者保持稳定，即“喀喇昆仑异常”[4－6]。GARDELLE 等利用两期数字高程模型（DEM）进行研究，发现喀喇昆仑山冰川在 1999—2008 年呈现正物质平衡状态（$+0.11 \pm 0.22$ m w.e. a^{-1}）[5]，GARDNER 等和 KÄÄB 等分别利用 ICESat GLAS 数据对喀喇昆仑山冰川表面高程变化进行估算，前者结果为 $-0.12 \pm 0.15\ m \cdot a^{-1}$，后者为 $-0.10 \pm 0.06\ m \cdot a^{-1}$[7－8]；BRUN 等利用多期 ASTER DEM 计算冰川物质平衡，发现喀喇昆仑山 2000—2016 年冰川物质平衡接近于平衡状态（-0.03 ± 0.07m w.e. a^{-1}）[9]，林晖等使用 TanDEM-X 与 SRTM dem 进行差分获得结果为 $0.02 \pm 0.064\ m \cdot a^{-1}$[10]，BOLCH 等和 ZHOU 等也与之相当结果[11－12]。不过以上研究结果也同时表明冰川变化空间差异性大，具体到冰川尺度，其差异性更大。GARDELLE 等[13]研究表明典型大型表碛覆

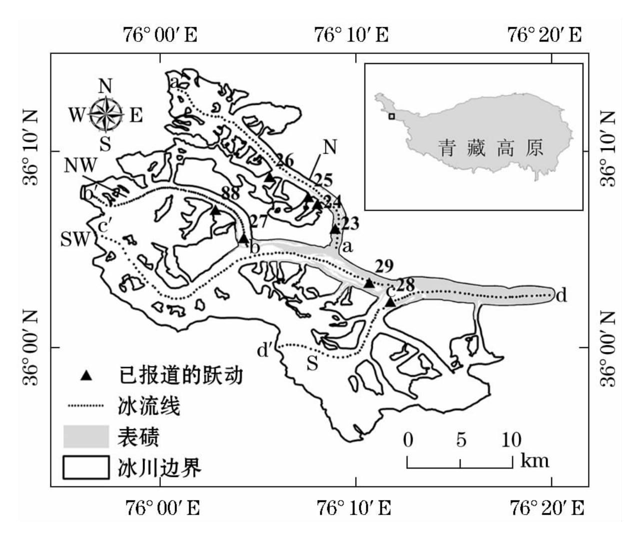
① **收稿日期：**2019－06－01； **修订日期：**2019－10－12
基金项目：国家自然科学基金国际合作项目（41761144075）；国家自然科学基金（41471067，41701087，41871058）；云南大学人才项目（YJRC3201702）资助
作者简介：蒋宗立（1975－），男，湖南省泸溪县人，博士，副教授，主要从事冰川变化遥感研究．E-mail：jiangzongli@hnust.edu.cn
通讯作者：张震，男，副教授，冰川遥感．E-mail：zhangzhen@aust.edu.cn

盖冰川呈现与其他类型冰川明显的差异性响应，表现为显著的物质亏损状态。表碛覆盖冰川在该区域分布广泛，与裸冰相比，表碛覆盖层由于反射率、颗粒大小、颜色等物理性质的差异，具有独特的热力过程，导致其下覆冰川冰的消融过程不同[14]，使得表碛覆盖冰川与其他类型冰川对同样的气候变化条件显示了不同的响应特征。野外观测试验与研究表明[15-16]，表碛厚度及其空间分布对下覆冰川消融过程的影响显著，从而影响冰川物质平衡的空间分布特征与高度结构特征。同时大型表碛覆盖冰川冰储量丰富，对区域河川径流和水资源有重要影响，在气候变暖的影响下，冰川储量的变化影响着下游水资源和灾害风险。此外喀喇昆仑山的冰川跃动也存在不同的机理[17]。因此选择大型表碛覆盖型冰川进行详细研究十分必要。音苏盖提冰川位于喀喇昆仑山中部，是中国境内覆盖面积最大的冰川，也是典型的大型表碛覆盖冰川，该冰川分支发生过多次跃动，据 COPLAND 等[6]的研究表明，该冰川至少有 8 处发生过跃动或者疑似跃动，其中 5 处确认发生过跃动。蒋宗立等和刘星月等针对音苏盖提冰川运动速度进行了详细研究[18-19]，但目前还缺乏与音苏盖提冰川高程变化的相结合研究，集成研究结果将有助于提高对大型表碛覆盖冰川的冰川变化差异响应和冰川跃动机制的认识。

由于音苏盖提冰川深居克勒青河中上游，地面补给困难、人力难以企及，而遥感技术是目前切实可行的研究手段。近些年随着光学遥感技术的不断发展，在高分辨率 DEM 数据提取方面取得了较大进展，但是受云遮等天气条件所限制，且冰雪对于可见光的反射率过高，难以在冰雪覆盖区域获取特征点，获取冰雪区数字高程模型误差很大。合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar，SAR）主动微波传感器不受云雪影响，全天候、全天时工作可弥补光学影像的不足，国内外学者利用合成孔径雷达干涉测量（InSAR）方法获取了大范围高精度的数字高程模型数据，并且广泛应用于冰川变化等研究[20-24]。本文利用 TanDEM-X/TerraSAR-X（TDX/TSX）双星系统的 SAR 数据和 SRTM-X DEM 数据，采用 D-InSAR 方法获取了 2000—2014 年音苏盖提冰川表面高程变化信息，并对其冰川表面高程变化特征进行分析讨论。

1 研究区概况

喀喇昆仑山是全球中低纬度地区山地冰川分布数量最多、冰川规模最大的区域之一。该区域位于亚欧大陆中心，属于典型大陆型气候，气温年较差大，降水稀少。但由于该区域位处西风带，又受到减弱印度洋西南季风的影响，有冰川分布的高海拔地区年降水量可达 2 000 mm 以上。音苏盖提冰川（中心位置坐标为 36.083°N，76.1028°E）位于喀喇昆仑山中部乔戈里峰西侧北坡、克勒青河中段的南岸，总面积为 493 km^2，是我国面积最大的冰川[25]（图 1）。冰川主体呈自西向东的流向，由 4 条主要冰流（SW、NW、N、S）和超过 10 条小分支冰流汇流而成，冰川主流线最大长度达 42 km，末端海拔约 4 000 m，西南分支冰流（SW）为冰川主源头（图 1）。



注：N 为北冰流，NW 为西北冰流，SW 为西南冰流，S 为南冰流，已报道的跃动冰川序号与 Copland 等研究保持一致

图 1　音苏盖提冰川位置范围

Fig. 1　Location and extent of Yengisogat Glacier

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文主要采用航天飞机地形测绘任务（Shuttle Radar Topographic Mission，SRTM，2000 年 2 月）X-波段 DEM 与 TanDEM-X/TerraSAR-X（TDX/TSX）数据（2014 年 2 月）对冰川表面高程变化进行分析（表 1）。SRTM 是美国宇航局（NASA）2000 年发射的“奋进”号航天飞机上搭载的对地观测雷达系统，在轨高度 233 km，使用 C 波段和 X 波段分别采用 225 km 和50 km的幅宽进行地面扫描，获取了56°S到

表 1　数据源

Tab. 1　Information of data sources used

数据	获取时间	工作波段	分辨率 / m
TDX/TSX	2014 年 2 月 8 日 2014 年 2 月 19 日	X 波段	8 × 10
SRTM DEM	2000 年 2 月	C 波段 X 波段	30 × 30

60°N 之间的 DEM 数据,空间分辨率为 1 弧秒,约为 30 m[26]。TDX/TSX 系统是德国宇航局(DLR)2007 年 6 月和 2010 年 6 月分别发射的两颗 SAR 卫星组成的单轨双天线双星分布式系统,在轨高度 514.8 km,重复周期 11 d,聚束模式下分辨率可达 1 m[27]。本研究使用该系统双基站 strip map 模式获取的精确配准的单视复(Single Look Complex,SLC)数据对。

2.2　研究方法

使用 1 弧秒 SRTM dem,像素大小为约 30 m,对 TanDEM-X/TerraSAR-X 干涉图进行 12 × 15 多视处理,与 SRTM dem 像素大小一致。InSAR 生成的干涉相位中包括地形相位、基线误差导致的相位、形变相位、大气延迟引起的相位及噪声相位,因双基站模式的大气延迟、噪声相似,干涉计算之后可以忽略,也不存在形变相位。为得到地表高程变化,通过差分处理,去除 SRTM DEM 模拟的地形相位,并去除基线误差导致的线性趋势相位,从而得到冰川表面高程变化的残差相位,把残差相位转化为高程变化值,即可获得冰川表面的变化[22,28]。

本文采用的参考 DEM 是 2000 年获取的 SRTM-X dem 数据,相对于 SRTM C dem,SRTM-X dem 噪声比较大;因 SRTM-X 或 C DEM 在喀喇昆仑山坡度很大的区域存在大量数据空洞,这些空值区域分布在海拔较高区域,即冰川积累区,予以剔除。但在数据预处理时使用填补了空值区域的完整覆盖数字高程模型。

由于两对 TSX/TDX 影像获取时间为 2 月份,而且仅仅相差 11 d,本文忽略此时间段的冰川高程变化。不过由于轨道偏移等因素的影响,两对影像的计算结果在重叠区域有一定误差,为了消除该部分误差,本文对两幅影像结果的重叠区域误差进行了统计分析,结果发现其间存在显著的线性关系(图 2)。因此根据拟合得到的线性关系式以 2014 年 2 月 8 日的数据结果为基准对 2014 年 2 月 19 日的数据结果进行高程调整,使得两幅结果图可以无缝

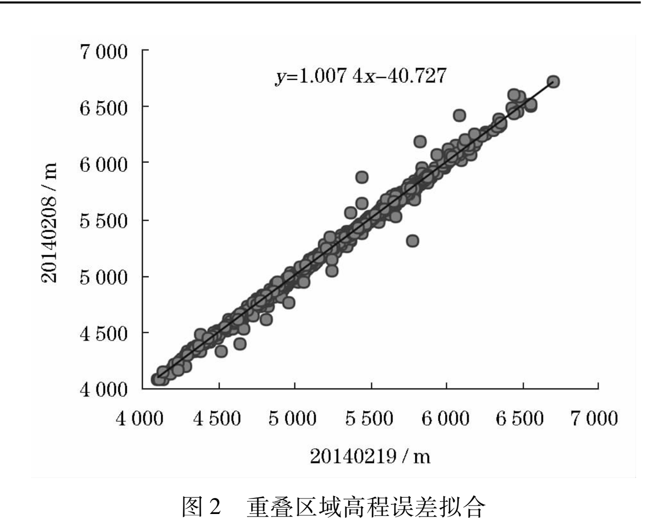


图 2　重叠区域高程误差拟合

Fig. 2　Fitted trend line of elevation error

拼接。此外,选在非冰川相对平坦区域进行计算结果的误差计算[28],最终误差为:±0.07 m · a^{-1}。

3　结果与分析

2000—2014 年音苏盖提冰川表面高程平均下降了 1.68 ± 0.94 m,即冰川整体厚度在减薄,年变化率为 −0.12 ± 0.07 m · a^{-1}。冰川表面高程变化分布不均,其中北冰流(N)上游(图 3a 和图 4a)、西北冰流(NW)上游(图 3b 和图 4b)、北冰流中部(图 3c 和图 4a)、西北冰流中部(图 3d 和图 4b)和干流中部(西南冰流,图 3e 和图 4c)均有明显的冰川增厚现象,其中干流中部增厚最为显著,最大增厚 45.77 m。南冰流冰川(图 4d)减薄最为显著,其中末端变化尤为强烈。

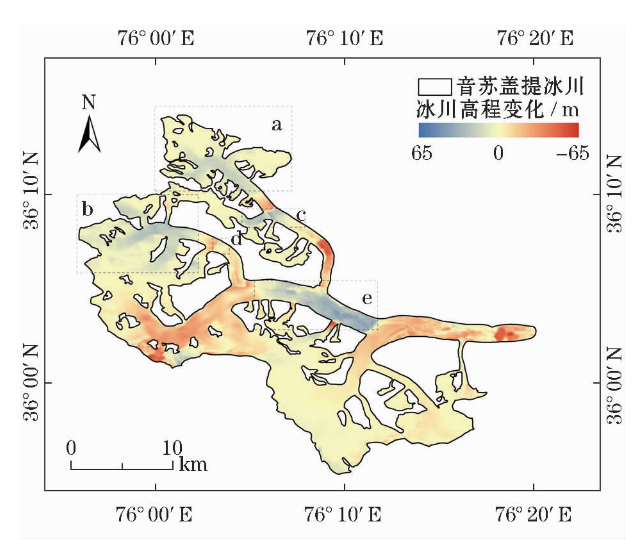


图 3　2000—2014 年冰川表面高程变化

Fig. 3　Results of elevation changes between 2000 and 2014

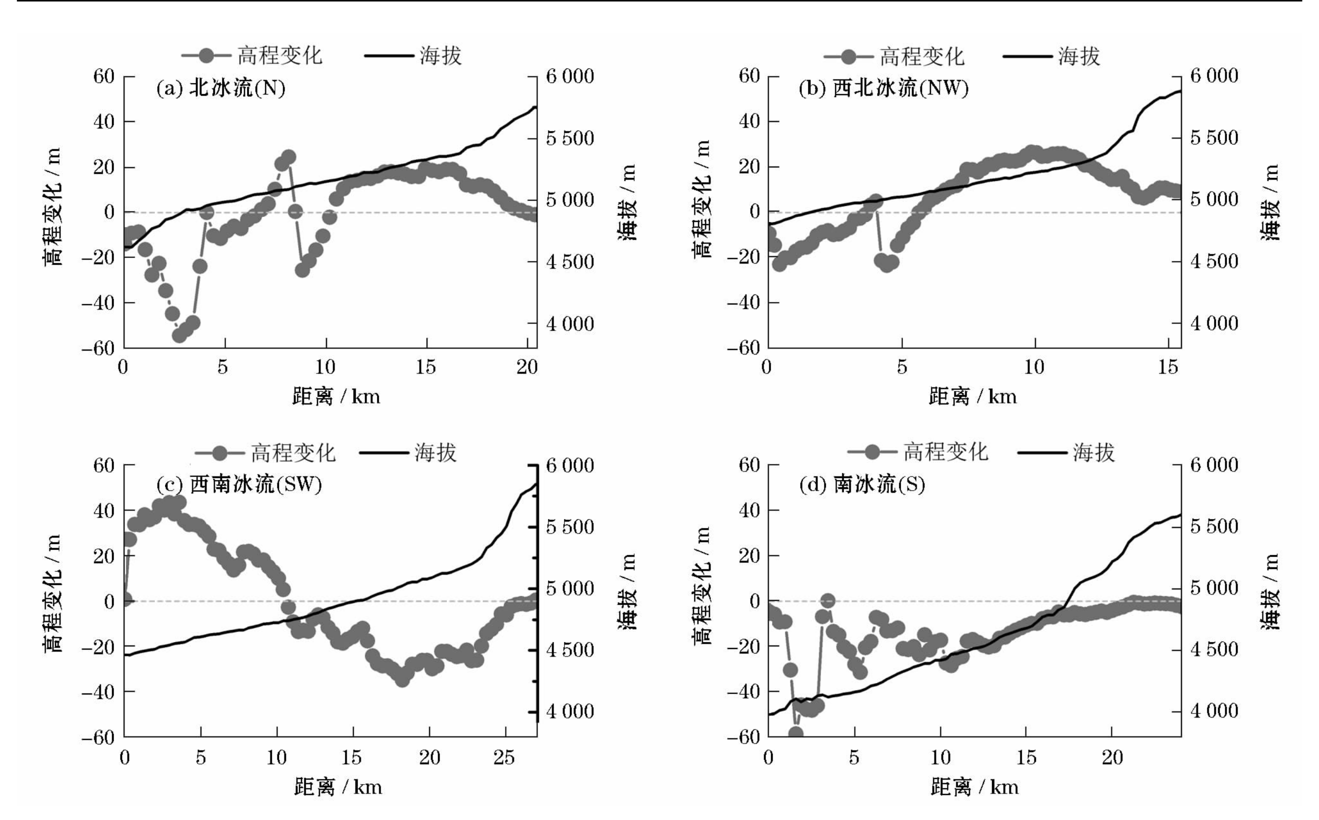


图 4　音苏盖提冰川主要分支表面高程变化剖面图

Fig. 4　Surface elevation change profiles along the main flows of Yengisogat Glacier

4　讨论

4.1　冰川高程变化影响因素

降水与气温是影响冰川发育的主要气候因子,温度影响冰川消融,降水影响冰川积累,两者变化共同决定冰川的性质、发育与变化。周围气象站资料表明,近些年该地区气温和降水都有升高的趋势,气温升高导致冰川消融,降水增加又在一定程度上弥补了冰川的消融。由于喀喇昆仑山气象观测资料比较稀少,并且局部气候较为复杂,无法对冰川高程变化与气候变化进行定量分析。不过一般情况下,气温变化对冰川物质平衡起主导作用,一方面气温每上升 1 ℃的物质亏损需要降水增加 25% 才能弥补,另一方面气温升高导致液态降水比例增多以及加快冰川表面的融雪过程,降低冰川表面反照率,促进冰川消融。本研究中冰川表面高程降低,主要是受气温升高所影响。

地形影响水热分布,从而影响冰川的积累和消融。研究结果表明(图 5),音苏盖提冰川雪线海拔高度在 5 310 ~ 5 500 m 之间,雪线海拔以上表面高程基本保持不变。雪线以下海拔 4 500 ~ 4 700 m 之间冰川表面明显增厚,此部分增厚是由跃动造成的,海拔 4 700 m 以上到雪线的冰体发生卸载转移至海拔 4 500 ~ 4 700 m 之间。海拔 4 500 m 以下冰川厚度减薄随着海拔升高较为显著,受冰川运动的影响,高程变化的海拔依赖关系也受到一定的波动。低海拔表碛区域的冰川减薄比裸冰区显著,可能是此区域表碛相对较薄,薄表碛具有较小的热容,内部具有很高的热传导率,从而促进冰川消融,同时薄表碛区域冰面湖、冰崖等也较为发育,伴随着热喀斯特作用对冰面具有加剧消融作用。

坡度小于 30 °时,冰川厚度减薄随着坡度的减小而加剧,较为平坦的区域一般海拔较低,且坡度较缓区域冰川运动速度较慢,受到高海拔地区的补给较少(图 6)。坡度为 30 ° ~ 50 °时,冰川厚度变化较小,此区域一般在积累区,积累区变化较小。当坡度大于 50 °时,冰川厚度随着坡度的增加而加速减薄,该区域坡度陡峭,易发生雪崩或者冰崩,从而导致表面高程减薄,不过该区域冰川面积非常小,较陡峭的区域本身就不利于雪冰的积累。

由图 7 可知,南坡冰川厚度略微增加(0. 01 m),西南坡向冰川厚度略微减薄(−0. 03 m),其他坡向冰川厚度减薄明显,尤其是北坡和西北坡。南坡和西南坡主要对应北冰流和西北冰流,北坡主要

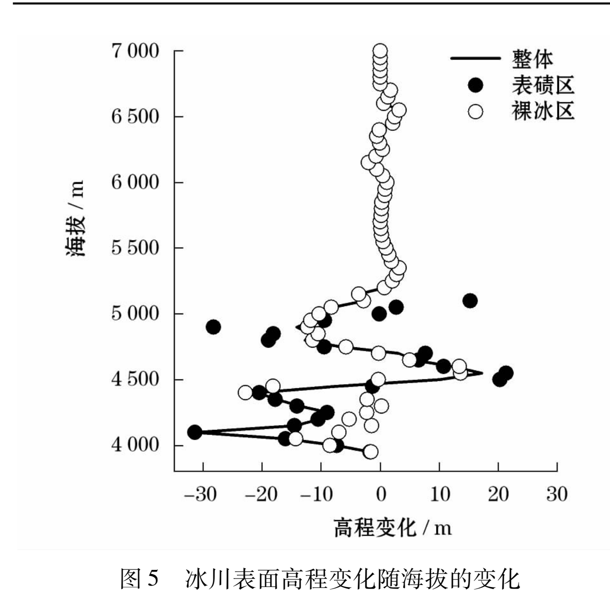


图 5　冰川表面高程变化随海拔的变化

Fig. 5　Glacier surface elevation changes with increase of the altitude

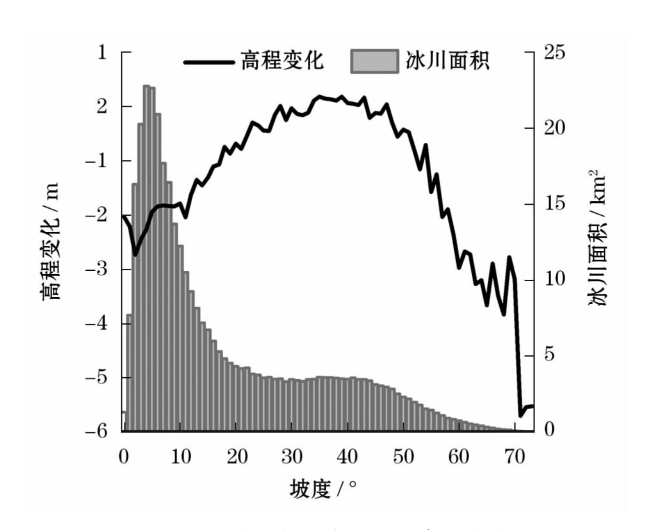


图 6　不同坡度的冰川平均高程变化

Fig. 6　Average elevation change with the slope variation

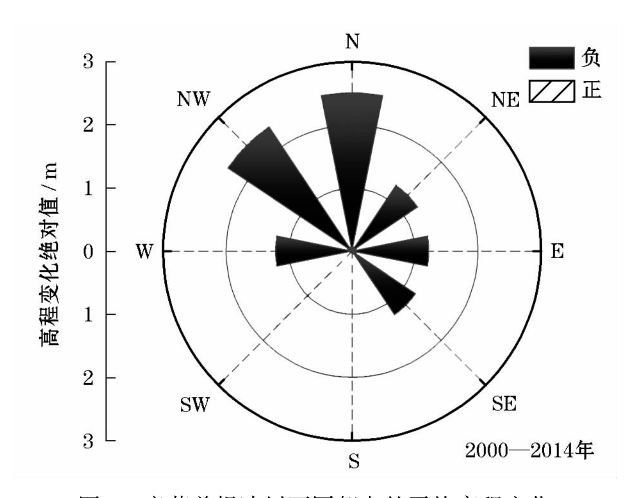


图 7　音苏盖提冰川不同朝向的平均高程变化

Fig. 7　Average elevation change for different aspect of Yengisogat Glacier

对应朝南冰流和朝西南冰流，从图 3 空间分布格局上也可以看出，朝北冰流和西北冰流积累区明显增厚，冰川表面高程整体变化较小，这是朝南冰流接收更多太阳辐射的缘故。

北冰流上游和西北冰流上游均位于或者接近积累区，陡壁下山谷内的冰川增厚尤为明显，该部分冰川物质很可能来源于陡壁处的雪崩和各小分支冰川的汇流。西北冰流中部、北冰流中部和干流中部的上端冰川有明显的减薄，因此可认为其物质分别大幅度转移至西北冰流中部、北冰流中部和干流中部，其物质转移可能是受跃动所驱动。也可能是南分支冰流几乎阻断了主干冰流，冰川物质在此堆积，厚表碛覆盖使得消融减弱，冰川厚度增加，该区域冰川厚度的持续增加，有可能导致主干向前推进，重新成为主冰流。南冰流冰川（图 6b）减薄最为显著，其中末端变化尤为强烈。南冰流（南斯嘎姆里冰川）在 1978—1990 年间发生过跃动，并取代西南冰流的主导地位。虽然南冰流冰川不在跃动期，但冰川流速较大，COPLAND 等[29]研究发现 2006—2007 年南冰流消融区上游冰川运动速度大于 200 m · a^{-1}，且末流速度逐渐减小，蒋宗立等和刘星月等的研究结果也与之类似[18-19]。较快的冰川流速导致冰川物质不断由上游转移到下游，低海拔冰川更容易受到气温升高的影响，因此南冰流冰川整体减薄较为显著。与此同时，南分支以下区域至冰川末端冰流速度却非常微弱，导致末端冰川得不到更多的物质补给。因此，在气温变暖的影响下，末端及附近区域冰川减薄最为显著。结合前期获得的流速分布特征，我们推断：有可能是南分支冰流几乎阻断了主干冰流，上游传输的冰川物质在此堆积，加上厚表碛覆盖使得消融减弱，冰川厚度增加，该区段冰川厚度的持续增加，有可能导致主干向前推进，重新成为主冰流。

4.2　冰川跃动

冰川跃动通常是指冰川周期性地在较短时间内运动速度突然加快并引起冰川物质快速转移和冰体重新分布的现象。由图 3 可以看出，c、d、e 处冰体明显增厚，同时上游出现了明显减薄，符合冰川跃动特征，其中 e 处最为明显。蒋宗立等研究发现西南冰流在 2007—2009 年冰川运动速度很快（100 m · a^{-1}），QUINCEY 等认结果表明该冰流 2012 年 6 ~ 8 月运动速度约 900 m · a^{-1}，随后冰川运动速度快速下降，即 2012 年 6 ~ 8 月可能处于跃动期最高峰。COPLAND 等认为该冰川 1973 年以前发生过跃动，

本研究无法判断出该冰川在此发生跃动的具体时间,不过根据现有资料,2012 年发生跃动的可能性大一些。图 3 的 c 处和 d 处跃动特征不显著,c 处此前没有报道过跃动现象,不过其所在北音苏盖提冰川有多次跃动或疑似跃动现象,其中 c 处西南侧支(图 1 中 26 号点)1977—1990 年曾发生过跃动;d 处此前也没有跃动现象的报道,其西南侧支 1990—2001 年曾发生过跃动。本研究补充了 COPLAND 等研究结果,认为音苏盖提冰川至少有 11 处跃动或者疑似跃动迹象,COPLAND 等的结果确认了 5 处为跃动[6],本研究确认西南冰流(图 3e 处)为跃动。

目前,冰川跃动的原因主要有两种机制,一是热力学机制(多温型冰川,比如斯瓦尔巴特群岛类型的冰川),二是水文学机制(温冰川,比如阿拉斯加类型的冰川)[30]。QUINCEY 等[17]认为喀喇昆仑山的冰川不受任何单一机制所控制,并且与水文和地貌条件有关。对于高差极大的冰川来说,其补给区位于极高海拔,在消融区可下降到很低的海拔高度,其冰川温度的分布类型变化很大,往往在冰川上游为冷型,而在冰川下游为温型,整条冰川应该属于多温型,比如喀喇昆仑山的巴托拉冰川[31],音苏盖提冰川也可能属于多温型冰川。音苏盖提冰川是典型的树枝状冰川,其各个分支的性质可能存在差异,根据 QUINCEY 等[17]的研究结果,西南冰流跃动峰值速度较大,2012 年夏季运动速度达到峰值,然后运动速度趋于正常,跃动阶时间较短(几个月),不太符合热力机制引起的跃动。值得一提的是,音苏盖提冰川被称为裂隙冰川,冰面裂隙广泛分布,如果液态降水或者冰川融水从裂隙进入冰体,有可能改变其水文条件,水的润滑促进了冰川跃动。

4.3 与其他研究的比较

目前针对喀喇昆仑山冰川表面高程变化或者物质平衡研究中,普遍认为喀喇昆仑山冰川整体上呈现接近于平衡的状态,不过空间差异性很大。BRUN 等利用 2000—2016 年 ASTER DEM 得到音苏盖提冰川高程变化趋势为 $-0.11\ m \cdot a^{-1}$,冰川减薄速率高于喀喇昆仑山 2000—2016 年平均值 $-0.03\ m \cdot a^{-1}$[9],与本研究结果($-0.12\ m \cdot a^{-1}$)一致。ZHOU 等[12]利用 KH9 和 SRTM 的研究结果表明音苏盖提冰川所在的喀喇昆仑山中东部 1979—2000 年 $-0.19 \pm 0.08\ m \cdot a^{-1}$,高于整个喀喇昆仑山的 1979—2000 年平均值($-0.09 \pm 0.03\ m \cdot a^{-1}$)。因此,音苏盖提所在区域冰川亏损比喀喇昆仑山其他区域高,临近的一些冰川甚至呈正平衡状态,比如 Baltoro 冰川 1999—2010 年冰川物质平衡为 $+0.10 \pm 0.13$ m w. e. a^{-1}[13],该冰川在此期间没有跃动的迹象,除了地形差异外,跃动后冰川物质从上游转移到下游,低海拔冰体受气温影响更敏感,物质亏损相对较大,音苏盖提冰川跃动比较频繁,跃动后冰川表面高程减薄速度加快。

5 结论

鉴于目前缺乏冰川尺度的大型表碛覆盖型冰川高程变化的详细研究,本文基于 TanDEM-X/TerraSAR-X(2014 年 2 月)与 SRTM-X DEM(2000 年 2 月)的差分干涉测量方法进行了音苏盖提冰川表面高程变化的研究,结果表明:

(1) 2000—2014 年音苏盖提冰川表面高程平均下降了 1.68 ± 0.94 m,即冰川整体厚度在减薄,年变化率为 $-0.12 \pm 0.07\ m \cdot a^{-1}$。冰川表面高程变化分布不均,其中南冰流冰川整体减薄较为显著,南冰流冰川运动速度较快,高海拔的冰川物质转移到低海拔区域,加快了消融的进程。

(2) 气温升高是冰川减薄的主因,地形影响水热条件,进而影响冰川厚度变化。冰川厚度减薄随着海拔升高先下降后保持稳定,但也呈现一定的波动性。低海拔表碛区域消融大于裸冰区,薄表碛热容小、热传导高、覆盖大量冰面湖塘和冰崖,促进了冰川消融。坡度小于 30 °时,冰川厚度减薄随着坡度的减小而加剧。南坡和西南坡向冰川厚度几乎不变,其他坡向冰川厚度减薄明显。

(3) 本研究补充了 COPLAND 等音苏盖提冰川跃动事件,认为 2000—2014 年音苏盖提冰川有 3 处跃动或疑似跃动的现象。

即使喀喇昆仑山冰川整体微弱物质增加,对于表碛覆盖的音苏盖提冰川而言,近 14 a 来处于物质亏损状态。

致谢:感谢 DLR AO 科学用户(syl_cas_XTI_LAND6642)提供 TanDEM-X/TerraSAR-X 干涉数据与 SRTM-X dem 数据。

参考文献(References)

[1] OERLEMANS J, REICHERT B K. Relating glacier mass balance to meteorological data by using a seasonal sensitivity characteristic

[J]. Journal of Glaciology,2000,46(152):1 - 6.
[2] 牟建新,李忠勤,张慧,等. 中国西部大陆性冰川与海洋性冰川物质平衡变化及其对气候响应——以乌源 1 号冰川和帕隆 94 号冰川为例[J]. 干旱区地理,2019,42(1):20 - 28. [MU Jianxin,LI Zhongqin,ZHANG Hui,et al. Mass balance variation of continental glacier and temperature glacier and their response to climate change in western China:Taking Urumuqi Glacier NO. 1 and Parlung NO. 94 Glacier as examples[J]. Arid Land Geography,2019,42(1):20 - 28.]
[3] 刘洁,黄金川,林浩曦. 冰冻圈水资源服务功能区划研究综述[J]. 干旱区地理,2018,41(4):751 - 760. [LIU JIE,HUANG Jinchuan,LIN Haoxi. A literature review on regionalization of water resource service function of cryosphere in China[J]. Arid Land Geography,2018,41(4):751 - 760.]
[4] HEWITT KENNETH. The Karakoram anomaly? Glacier expansion and the ‘elevation effect’,Karakoram Himalaya[J]. Mountain Research and Development,2005,25(4):332 - 340.
[5] GARDELLE J,BERTHIER E,ARNAUD Y. Slight mass gain of Karakoram glaciers in the early twenty-first century[J]. Nature geoscience,2012,5(5):322 - 325.
[6] COPLAND L,SYLVESTRE T,BISHOP M P,et al. Expanded and recently increased glacier surging in the Karakoram[J]. Arctic, Antarctic,and Alpine Research,2011,43(4):503 - 516.
[7] GARDNER A S,MOHOLDT G,COGLEY J G,et al. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise:2003 to 2009 [J]. Science,2013,340(6137):852 - 857.
[8] KÄÄB A,TREICHLER D,NUTH C,et al. Brief communication: Contending estimates of 2003—2008 glacier mass balance over the Pamir-Karakoram-Himalaya[J]. The Cryosphere,2015,9(2):557 - 564.
[9] BRUN F,BERTHIER E,PATRICKW,et al. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016[J]. Nature Geoscience,2017,10(9):668 - 673.
[10] LIN H,LI G,CUO L,et al. A decreasing glacier mass balance gradient from the edge of the upper Tarim Basin to the Karakoram during 2000—2014[J]. Scientific Reports,2017,7:6712.
[11] BOLCH T,PIECZONKA T,MUKHERJEE K,et al. Brief communication:Glaciers in the Hunza catchment (Karakoram) have been nearly in balance since the 1970s[J]. The Cryosphere,2017,11(1):531 - 539.
[12] ZHOU Y S,LI Z W,LI J,et al. Geodetic glacier mass balance (1975—1999) in the central Pamir using the SRTM DEM and KH-9 imagery[J]. Journal of Glaciology,2019,65:309 - 320.
[13] GARDELLE J,BERTHIER E,ARNAUD Y,et al. Region-wide glacier mass balances over the Pamir-Karakoram-Himalaya during 1999—2011[J]. The Cryosphere,2013,7(4):1263 - 1286.
[14] ÖSTREM G. Ice melting under a thin layer of moraine,and the existence of ice cores in moraine ridges[J]. Geografiska Annaler, 1959,41(4):228 - 230.
[15] BENN D I,BOLCH T,HANDS K,et al. Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming,and implications for outburst flood hazards[J]. Earth-Science Reviews, 2012,114(1 - 2):156 - 174.
[16] ZHANG Y,FUJITA K,LIU S Y,et al. Distribution of debris thickness and its effect on ice melt at Hailuogou glacier,southeastern Tibetan Plateau,using in situ surveys and ASTER imagery[J]. Journal of Glaciology,2011,57(206):1147 - 1157.
[17] QUINCEY D J,GLASSER N F,COOK S J,et al. Heterogeneity in Karakoram glacier surges[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface,2015,120(7):1288 - 1300.
[18] JIANG Z L,LIU S Y,PETERS J,et al. Analyzing Yengisogat Glacier surface velocities with ALOS PALSAR data feature tracking, Karakoram,China[J]. Environmetal Earth Sciences,2012,67(4):1033 - 1043.
[19] 刘星月,蒋宗立,刘时银,等. 音苏盖提冰川表面流速特征分析[J]. 地球学报,2018,39(1):103 - 110. [LIU Xingyue,JIANG Zongli,LIU Shiyin,et al. An analysis of surface velocities on Yengisogat glacier,Karakoram China[J]. Acta Geoscientica Sinica,2018,39(1):103 - 110]
[20] ZEBKER H A,GOLDSTEIN R M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations[J]. Journal of Geophysical Research,1986,91(B5):4993 - 4999.
[21] KWOK R,FAHNESTOCK M A. Ice sheet motion and topography from radar interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,1996,34(1):189 - 200.
[22] RANKL M,BRAUN M. Glacier elevation and mass changes over the central Karakoram region estimated from TanDEM-X and SRTM/X-SAR digital elevation models[J]. Annals of Glaciology, 2016,51(71):273 - 281.
[23] RIZZOLI P,MARTONE M,GONZALEZ C,et al. Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017,132:119 - 139.
[24] LAMBRECHT A,MAYER C,WENDT A,et al. Elevation change of Fedchenko Glacier,Pamir Mountains,from GNSS field measurements and TanDEM-X elevation models,with a focus on the upper glacier[J]. Journal of Glaciology,2018,64(246):637 - 648.
[25] 刘时银,姚晓军,郭万钦,等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报,2015,70(1):3 - 16. [LIU Shiyin,YAO Xiaojun,GUO Wanqin,et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory[J]. Acta Geographica Sinica,2015,70(1):3 - 16.]
[26] MARSCHALK U,ROTH A,EINEDER M,et al. Comparison of DEMs derived from SRTM/X and C-Band[C]//Conference:The Shuttle Radar Topography Mission-Data Validation and Applications,Reston,Virginia,USA,2005,Cite this publication.
[27] RIZZOLI P,BRÄUTIGAM B,KRAUS T,et al. Relative height error analysis of TanDEM-X elevation data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2012,73:30 - 38.
[28] NECKEl N,BRAUN A,KROPÁČek J,et al. Recent mass balance of the Purogangri Ice Cap,central Tibetan Plateau,by means of differential X-band SAR interferometry[J]. The Cryosphere,2013,7

(5):1623 - 1633.

[29] COPLAND L, POPE S, BISHOP M P, et al. Glacier velocities across the central Karakoram[J]. Annals of Glaciology, 2009, 50(52):41 - 49.

[30] MURRAY T, STROZZI T, LUCKMAN A, et al. Is there a single surge mechanism? Contrasts in dynamics between glacier surges in Svalbard and other regions[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(B5):2237, doi:10.1029/2002JB001906.

[31] 谢自楚,刘朝海. 冰川学导论[M]. 上海:上海科学普及出版社,2010:490. [XIE Zichu, LIU Chaohai. Introduction of Glaciology[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Publishing House, 2010:490.]

Surface elevation changes of Yengisogat Glacier between 2000 and 2014

JIANG Zong-li[1], WANG Lei[1], ZHANG Zhen[2], LIU Shi-yin[3], ZHANG Yong[1], TANG Zhi-guang[1], WEI Jun-feng[1] HUANG Dan-ni[2], ZHANG Sha-sha[2]

(1 *Hunan University of Science and Technology*, *Xiangtan* 411201, *Hunan*, *China*;

2 *School of Geomatics*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan* 232001, *Anhui*, *China*;

3 *Institute of International Rivers and Eco-Security*, *Yunnan University*, *Kunming* 650500, *Yunnan*, *China*)

Abstract: The Karakoram glaciers are attracting more and more attentions for 'Karakoram Anomaly' due to glacier surge or positive mass balance. To understand the mechanism of the glacier surge or positive mass balance, a huge debris-covered glacier - Yengisogat glacier was selected to be investigated in detail. Yengisogat glacier, the glacier of the largest area in China, developed on the northern slope of K2 located in the Karakoram Mountains, is a dendritic glacier covered area of 493 km^2 with four main tributaries and more than ten small glacier flows. TanDEM-X/TerraSAR-X data (acquired in Feb. 2014) and SRTM-X dem (acquired in Feb. 2000) were employed to calculate the glacier elevation change using differential interferometry method. Similar penetration depth was assumed for the same acquired season. The glacier surface elevation change and surface velocities from published articles were integrated to discuss the mass change characteristics. The results indicated that the glacier average surface elevation was decreased by 1.68 ± 0.94 m between 2000 and 2014, which means that the glacier has lost mass by -0.12 ± 0.07 $m \cdot a^{-1}$. The glacier surface elevation changes showed no uniformity. The southern main tributary was decreased drastically. This was caused by rapid surface flow velocities which transfer the glacier mass from high altitude to low altitude ablation area. The southern main tributary occupied the original glacier trunk impeded the glacier mass transfer to low elevations which made the section elevation increased. The increased surface elevation in the tongue of glacier main trunk may be explained by glacier surge. Glacier surface elevation started to decrease along with the elevation increasing and then stayed stable, yet showing volatility at the same time. Surface elevation of thin debris-covered glacier in low altitude zones was prone to decrease than that of the exposed glacier ice. Glacier surface elevation was decreased more dramatically with the decreasing of glacier surface slope in the area where slope are less than 30 degrees. Surface elevation of glaciers with southern orientation was increased slightly while that with south-west orientation was decreased slightly, and the others were decreased drastically. The debris-covered Yengisogat Glacier experienced an overall surface elevation decline which indicated it had the mass loss although it had some local surface elevation increase due to the glacier surge.

Key words: Yengisogat Glacier; TDX/TSX; D-InSAR; surface elevation change; glacier surge